

УДК 551.5

На правах рукописи



Червяков Максим Юрьевич

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ АЛЬБЕДО И
ПОГЛОЩЁННОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ И РЕАКЦИЯ ЗЕМНОЙ
КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Казань – 2015

Работа выполнена на кафедре метеорологии и климатологии
географического факультета ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского»

Научный руководитель:

Скляров Юрий Андреевич

доктор технических наук, заведующий
кафедрой метеорологии и климатологии
географического факультета СГУ

Официальные оппоненты:

Елисеев Алексей Викторович

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник Института
физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН

Чубарова Наталья Евгеньевна

доктор географических наук, профессор
кафедры метеорологии и климатологии
географического факультета МГУ им.
М.В. Ломоносова

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Пермский государственный
национальный исследовательский университет»

Защита состоится «18» июня 2015 года в 15:00 на заседании
Диссертационного совета Д 212.081.20 при Казанском федеральном университете
по адресу: 420097, г. Казань, ул. Товарищеская, д. 5, Институт экологии и
природопользования КФУ, ауд. 315.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И.
Лобачевского Казанского федерального университета. Электронная версия
автореферата размещена на официальном сайте Казанского федерального
университета (<http://kpfu.ru/>).

Ваш отзыв на автореферат просим направлять по адресу: 420008, г. Казань,
ул. Кремлевская, 18, Казанский федеральный университет, отдел аттестации
научно-педагогических кадров. Факс: (843) 2337867. E-mail: 1aotdel@kpfu.ru.

Автореферат разослан «20» апреля 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук, доцент



Ю.Г.Хабутдинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Изучение изменения климата, происходящего при совместном действии антропогенных и естественных факторов, является одной из приоритетных задач метеорологии и климатологии. Основным фактором, влияющим на глобальный климат, является изменение компонентов радиационного баланса - приходящей солнечной радиации, отраженной коротковолновой и уходящей длинноволновой радиации. Поэтому измерение и мониторинг компонентов радиационного баланса Земли (РБЗ) на верхней границе атмосферы (ВГА) является актуальной задачей.

Данные о радиационных потоках на ВГА и глобальные распределения составляющих радиационного баланса могут быть получены только с искусственных спутников. Большая часть таких космических экспериментов выполнена за рубежом. В России в 2009 г. на орбиту был выведен ИСЗ нового поколения «Метеор-М» № 1. В составе гелиогеофизического комплекса этого спутника пять лет проработал измеритель коротковолновой отражённой радиации ИКОР-М, созданный в Саратовском университете под руководством главного конструктора, профессора Ю.А. Склярова (1931-2014). По измерениям ИКОР-М можно определить такие компоненты радиационного баланса как поток коротковолновой отраженной радиации, альbedo и поглощенный поток солнечной радиации.

Мониторинг пространственных и временных изменений, составляющих РБЗ также представляет большой интерес для изучения изменчивости регионального климата, выявления облачно-радиационных обратных связей и особенностей климатических аномалий, подобных Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Эти данные могут использоваться в моделях общей циркуляции атмосферы и океана.

Цель работы: анализ данных измерений потока отраженной коротковолновой радиации радиометром ИКОР-М на ИСЗ «Метеор-М» № 1 в 2009 – 2014 гг. с целью построения карт глобальных распределений среднемесячных значений альbedo и поглощённой солнечной радиации на верхней границе атмосферы, оценка пространственно-временной изменчивости этих характеристик.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- оценка погрешностей измерений потока радиометром ИКОР-М, сравнение его шкалы с данными других космических экспериментов и определение широтных границ зоны, в которой проводился анализ составляющих радиационного баланса Земли;
- разработка методики расчетов среднемесячных значений альbedo и поглощённой солнечной радиации по данным спутниковых измерений потока отраженной коротковолновой радиации;
- построение карт глобальных распределений среднемесячных значений отраженной коротковолновой радиации, альbedo и поглощённой солнечной радиации на верхней границе атмосферы;

- анализ зависимости от широты зонально-осредненных значений составляющих радиационного баланса;
- изучение изменений альbedo и поглощённой солнечной радиации в различных районах Земли, включая регион действия явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также регион с муссонной активностью;
- оценка вклада облачности в величину альbedo для океана и суши.

Методическая основа: использованы современные статистические методы, включая корреляционный анализ и анализ трендов, а также методика построения карт глобальных распределений составляющих радиационного баланса с применением технологий геоинформационных систем.

Методологической основой послужили труды российских и зарубежных ученых, разработавших научные основы спутниковых исследований составляющих радиационного баланса Земли, в частности результаты диссертационных исследований Котумы А.И., Семеновой Н.В. и Фоминой Н.В., посвящены анализу данных ранее выполненных космических проектов (на ИСЗ «Метеор-3» № 7 и «Ресурс-01» № 4).

Исходные данные для обработки:

В качестве исходных данных использованы измерения потоков отраженной коротковолновой радиации аппаратурой ИКОР-М с гелиосинхронного ИСЗ «Метеор-М» № 1 за 2009-2014 гг; атласы NASA распределения альbedo и поглощенной солнечной радиации за 1975-1978 гг. и 1985-1987 гг.; архив карт распределения облачности на сервере NASA Earth observations (URL: <http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/Search.html>); архив изображений облачности, полученных с геостационарных спутников на сервере Naval Research Laboratory Monterey (URL: <http://www.nrlmry.navy.mil/sat-bin/global.cgi>).

Научная новизна результатов:

- разработана оригинальная методика получения среднемесячных величин альbedo и поглощённой солнечной радиации по измерениям потоков отраженной коротковолновой радиации аппаратурой ИКОР-М с ИСЗ «Метеор-М» № 1;
- получены независимые оценки потоков поглощенной солнечной радиации над различными географическими регионами земного шара и исследована их сезонная изменчивость;
- изучены особенности широтных распределений альbedo над океаном и сушей. Показано, что вклад облачности в альbedo наиболее заметен над океаном и составляет 72% зимой (при коэффициенте линейной корреляции $r = 0,85$), 38% летом ($r = 0,62$) и в среднем за год 64% ($r = 0,8$);
- впервые исследованы распределения поглощённой солнечной радиации в меридиональных разрезах на различных долготах;
- создан первый российский архив глобальных карт среднемесячных значений потоков отраженной солнечной радиации, альbedo и поглощенной солнечной радиации, который продолжает пополняться.

Практическая значимость работы

Разработанная методика расчетов, алгоритмы и компьютерные программы могут использоваться для анализа данных других спутниковых экспериментов по измерению составляющих радиационного баланса Земли и, в частности, проекта «Метеор-М» № 2.

Полученные карты распределений среднемесячных значений альбедо и поглощенной солнечной радиации могут быть использованы:

- в моделях общей циркуляции атмосферы и океана, применяемых для прогноза климатических изменений;
- при мониторинге климатических аномалий, подобных явлениям Эль-Ниньо и Ла-Нинья;
- при выявлении и анализе фаз наступления и развития Юго-восточного азиатского летнего муссона.

Результаты диссертации используются в учебном процессе на кафедре метеорологии и климатологии СГУ в курсах «Климатология», «Космическая метеорология» и «Методы зондирования окружающей среды. Полученные результаты включены в отчет по НИР «Земля», финансируемой Минобрнауки РФ в рамках базовой части (код проекта 2179).

Созданный общедоступный архив данных о распределениях альбедо и поглощенной солнечной радиации по измерениям с ИСЗ «Метеор-М» № 1 размещён на сервере Лаборатории измерения составляющих радиационного баланса Земли СГУ в сети Интернет (<http://www.sgu.ru/structure/geographic/metclim/balans>). Оперативность размещения материалов позволяет заинтересованным структурам использовать данные в научно-практических целях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методика анализа измерений потоков отраженной коротковолновой радиации аппаратурой ИКОР-М с ИСЗ «Метеор-М» № 1 позволяет получать среднемесячные значения величин альбедо и поглощённой солнечной радиации.

2. Широтные распределения компонентов радиационного баланса существенно различаются над различными регионами Земли, при этом величина поглощенного потока солнечной радиации может изменяться приблизительно в два раза.

3. Вклад облачности в альбедо наиболее заметен над океаном, испытывает заметные сезонные изменения и в среднем за год составляет более половины при высокой положительной корреляции этих характеристик.

4. Анализ полученных карт глобального распределения составляющих радиационного баланса позволяет уверенно регистрировать крупномасштабные климатические явления Эль-Ниньо, Ла-Нинья и Юго-восточный азиатский летний муссон.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов подтверждается применением калиброванного приемника излучения с учетом

эффектов его старения, независимым контролем шкалы при сравнении с данными других космических экспериментов, большим числом независимых оценок составляющих радиационного баланса, накопленным в отдельной ячейке сетки при месячном осреднении, а также использованием компьютерных программ, прошедших специальное тестирование.

Апробация работы

Материалы исследований докладывались и обсуждались на: Всероссийской научной конференции «Погода и климат: новые методы и технологии исследований» (Пермь, ПГУ, 2010 г.); Ежегодных Всероссийских открытых конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, ИКИ РАН, 2010-2014 гг.); Научно-практических конференциях «Presenting Academic Achievement to the World» (Саратов, СГУ, 2012-2015 гг.); Шестнадцатой международной конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты» (Звенигород, ИФА РАН, 2012 г.); Международной научной конференции по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Казань, КФУ, 2012 г.); Первой молодежной научно-практической летней школе Русского географического общества «География в современном мире: проблемы и перспективы» (Россия, Абрамцево, 2013 г.); Семнадцатой международной конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты» (Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2013 г.); Международной школе-конференции молодых учёных «Изменения климата и окружающей среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация» (Кисловодск, ИФА РАН, 2014 г.); XVIII Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Ярославская обл., п. Борок, ИФЗ РАН, 2014 г.); First International Scientific Conference of young scientists and specialists “The role of multidisciplinary approach in solution of actual problems of fundamental and applied sciences (Earth, technical and chemical)” (Азербайджан, Баку, НАНА, 2014); Международной конференции «Аэрозоль и оптика атмосферы» (Москва, ИФА РАН, 2014 г.); Международной школе молодых ученых European Research Course on Atmospheres 2015 (Франция, Гренобль, 2015), Международная конференция молодых учёных «Second Conference on Earth System Science» (Майнц, Германия, Институт химии общества Макса Планка, 22 - 30 марта 2015 г.).

Основные результаты работы докладывались также на ежегодных отчетных научных конференциях географического факультета СГУ и на объединенных семинарах кафедры метеорологии и климатологии с лабораторией астрономии и геофизики НИИ механики и физики СГУ.

Публикации

По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе пять статей [1-5] в журналах, входящих в список ВАК. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа редактирования и анализа полей для ИКОР «IKOR Fields Editor» [6].

Личный вклад соискателя

Автором разработаны алгоритмы и программа расчета составляющих радиационного баланса, выполнена математическая обработка всех данных наблюдений. Он участвовал в постановке задач, интерпретации полученных результатов, формулировке и обосновании выводов исследования, подготовке публикаций и докладов на семинарах, конференциях и научных школах.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы 146 страниц, включая 79 рисунков и 8 таблиц. Список цитируемой литературы насчитывает 156 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы измерения составляющих радиационного баланса Земли, сформулированы основные цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведена краткая история развития исследований составляющих радиационного баланса Земли с помощью космических аппаратов. Дано описание прибора нового поколения – радиометра ИКОР-М, разработанного



Рис. 1 Внешний вид радиометра ИКОР-М

в СГУ под руководством профессора Ю.А. Складова (1931-2014) и выведенного на гелиосинхронную орбиту на ИСЗ «Метеор-М» № 1 16 сентября 2009 г. Данный прибор, общий вид которого показан на рис. 1, предназначен для измерений потока отраженной коротковолновой радиации на орбите ИСЗ. По этим данным, возможно, провести расчет таких составляющих радиационного баланса Земли как альbedo и поток поглощенной солнечной радиации и осуществлять их мониторинг.

Прибор создан в виде единого автономного блока, включающего в себя вакуумированный приемник излучения и электронную систему регистрации. Основные технические характеристики радиометра ИКОР-М: диапазон измерения потока 50–500 Вт/м², спектральный диапазон 0,3 - 4,0 мкм, относительная погрешность измерений – не более $\pm 1\%$, постоянная времени – не более 10 с, угол обзора - 60°, режим работы – непрерывный, скорость отсчетов 1/с. Погрешности получаемых значений альbedo и поглощённой солнечной радиации не превосходят $\pm 2\%$.

Прибор ИКОР-М является среднеугольным измерителем с постоянным направлением его оптической оси к центру Земли. Это снимает ряд проблем, присущих сканирующим радиометрам – изменение расстояний до пикселей и их линейных размеров, различия углов наблюдения пикселей, требующее учёта анизотропии интенсивности отражённого излучения.

Для оценки надёжности данных, получаемых радиометром ИКОР-М, было проведено сравнение рассчитанного широтного распределения альбедо в тропической зоне в различные месяцы с данными эксперимента Earth radiation budget (ERB) на спутнике «Nimbus-6». В качестве примера на рис. 2 приведены результаты сравнений для сентября, которые показывают хорошее совпадение шкал приборов. Данные для других месяцев также демонстрируют близкие результаты. Следует отметить, что эти наблюдения разделены временным интервалом в 33 года, что может вносить дополнительные различия.

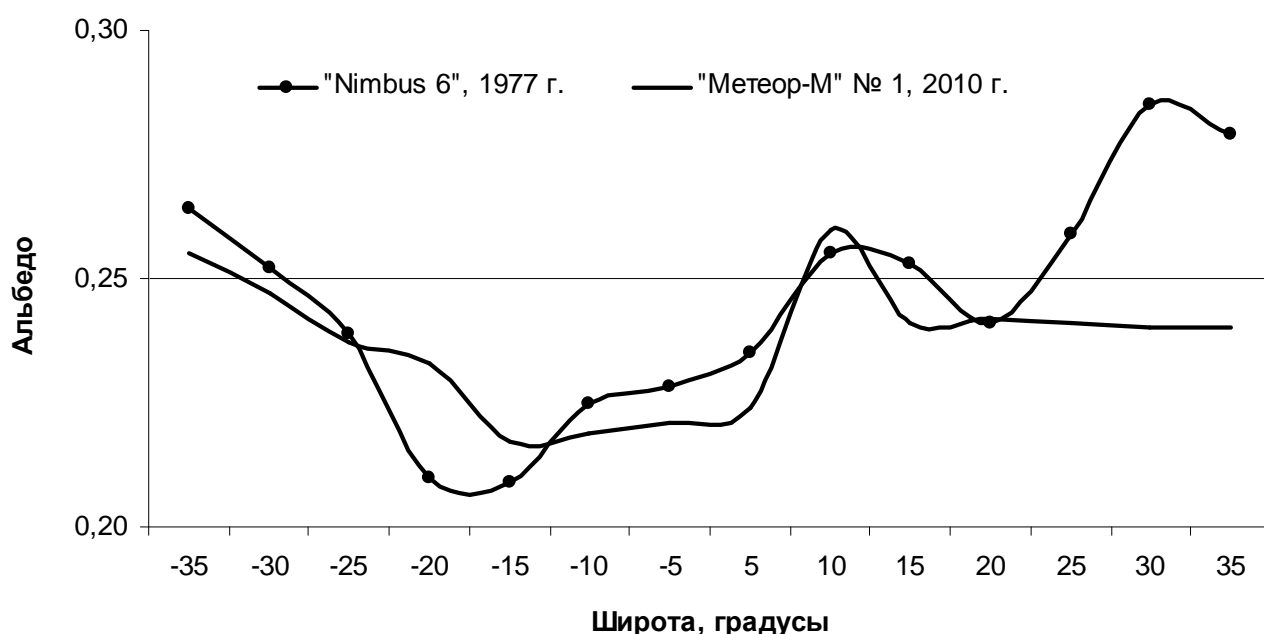


Рис. 2 Широтные распределения среднемесячных значений альбедо по измерениям радиометров ERB, установленного на ИСЗ «Nimbus-6», и ИКОР-М на ИСЗ «Метеор-М» № 1 в сентябре

Необходимо отметить, что прибор ИКОР-М имеет некоторые ограничения. Нижний порог системы регистрации оказался достаточно высоким. Когда поток становится меньше соответствующего значения, система регистрирует его как нулевой. В результате области Земли вблизи терминатора становятся недоступными для наблюдения. На рис. 3 показаны диапазоны широт, покрываемых наблюдениями, для различных месяцев года. Как видно из рисунка, покрытие близко к глобальному.

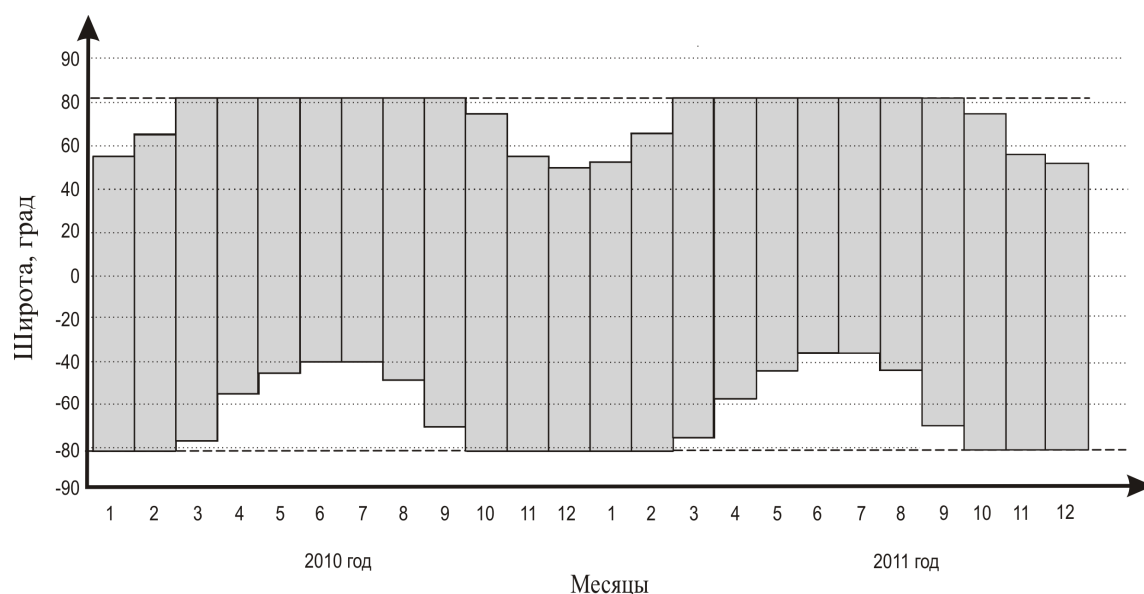


Рис. 3 Диапазоны широт, покрываемых наблюдениями радиометром ИКОР-М для различных месяцев года

Во второй главе описываются разработанные алгоритмы расчётов среднесуточных и среднемесячных значений потока отражённой коротковолновой радиации, альбедо и поглощённой солнечной радиации по результатам измерений.

На первом этапе обработки производится декодирование данных, сортировка информационных кадров радиометра ИКОР-М в хронологическом порядке и привязка измерений к бортовым дате и времени. В результате формируется текстовый файл, в котором содержится номер информационного кадра блока накопления данных, номер информационного кадра радиометра, бортовые дата и время каждого измерения, номер пакета данных, результаты измерения потока отражённой коротковолновой радиации и температуры корпуса прибора.

На втором этапе обработки производится привязка каждого измерения к географическим координатам и гринвичскому времени. Эти данные сохраняются в виде двоичных файлов в банке данных.

Третий этап обработки данных проводится с помощью программы редактирования и анализа полей «IKOR Fields Editor» [6], использующей в качестве источника сформированный на предыдущем этапе банк данных. При этом выполняются расчёты среднесуточных значений величин потока отражённой коротковолновой радиации и альбедо на уровне верхней границе атмосферы. Для представления данных на карте используется массив ячеек 2,5 x 2,5 градуса в длинах дуг большого круга Земли, приблизительно равных по площади, на которые разбивается вся поверхность верхней границы атмосферы, имеющая вид сферы с радиусом, превышающий средний радиус Земли на 30 км. Анализируются все мгновенные измерения, и определяется, в какую ячейку попадает центр поля зрения для каждого измерения. В результате, для каждой ячейки накапливается массив мгновенных измерений, по которым

рассчитываются среднесуточные значения. Альbedo практически всех сцен существенно зависят от зенитного угла Солнца, который изменяется в широких пределах. Этот фактор учитывался при получении среднесуточных значений альbedo из его мгновенных величин. По среднесуточным значениям альbedo рассчитываются их среднемесячные величины.

Знание среднемесячной величины альbedo α_m , позволяет рассчитать среднемесячные значения потока поглощённой радиации E_a в той же ячейке:

$$E_a = E_m(1 - \alpha_m), \quad (1)$$

где E_m – среднемесячное значение потока прямой солнечной радиации. Суточная инсоляция E на верхней границе атмосферы описывается известной формулой М.Миланковича:

$$E = (E_o T_o / \pi r^2) \cdot (t_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin t_s) \quad (2)$$

где E_o - солнечная постоянная, T_o – число секунд в сутках, r - текущее расстояние Земля-Солнце (в астрономических единицах), φ – широта центра ячейки, δ - склонение Солнца, а t_s - часовой угол Солнца в момент восхода или захода (в радианах), величина которого находится из известного соотношения:

$$\cos t_s = -\tan \varphi \cdot \tan \delta. \quad (3)$$

Формула (2) даёт суммарную энергию излучения, приходящего на единицу горизонтальной поверхности (в единицах Дж/м²). Для получения среднесуточного значения потока E_d (в единицах Вт/м²) величину E необходимо разделить на T_o , что даёт выражение:

$$E_d = (E_o / \pi r^2) \cdot (t_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin t_s). \quad (4)$$

Таким образом, получен массив среднесуточных значений величин E_d для данного месяца в каждой ячейки поверхности. Общая сумма этих величин, делённая на количество дней в месяце, даёт среднемесячные значения потока приходящей радиации E_m для каждой ячейки. Величины поглощённого потока солнечной радиации E_a рассчитываются для каждой ячейки по формуле (1).

Третья глава посвящена анализу особенностей распределения поглощённой солнечной радиации на верхней границе атмосферы в различных регионах Земли.

Для получения более устойчивых значений размеры области, в которой выполнялось осреднение, были выбраны достаточно большими, приблизительно совпадающими с размерами Австралии. На территории такой области размещается 111 ячеек сетки размером 2,5 x 2,5 градуса.

В таблице 1 представлены среднегодовые, минимальные и максимальные среднемесячные значения потока поглощённой солнечной радиации (Вт/м²) для разных территорий одинаковой площади в 2010 г.

Таблица 1

Среднегодовые, минимальные и максимальные среднемесячные значения потока поглощённой солнечной радиации (Вт/м^2) для разных территорий одинаковой площади в 2010 г.

Район расположения областей осреднения	Границы области осреднения		Среднее	min	max
	По широте, градусы	По долготе, градусы			
Австралия	15...40 ю.ш.	115...155 в.д.	300,4	195,6	393,9
Канада	65...45 с.ш.	140...60 з.д.	191,0	36,9	347,2
США	45...25 с.ш.	125...70 з.д.	265,3	142,8	372,2
Амазонская низм-ть	0...20 ю.ш.	80...35 з.д.	315,7	273,6	341,3
Сахара	30...15 с.ш.	15...30 в.д.	281,0	213,4	325,8
Южная Африка	0...30 ю.ш.	15...40 в.д.	315,1	254,1	357,7
Россия	65...45 с.ш.	50...105 в.д.	183,1	23,3	354,5
Индия и Индокитай	30...5 с.ш.	65...120 в.д.	290,8	225,7	344,3
Индонезия	90...150 в.д.	15 с.ш. ...10 ю.ш.	329,4	298,7	344,0
Европа	65...40 с.ш.	5 з.д. ...50 в.д.	209,4	59,2	358,6

Анализ таблицы 1 показывает, что минимальные среднемесячные значения поглощённой солнечной радиации наблюдаются в декабре на территориях, расположенных в России ($23,3 \text{ Вт/м}^2$) и Канаде ($36,9 \text{ Вт/м}^2$). Средние за год значения для этих территорий также самые низкие: $183,1 \text{ Вт/м}^2$ и $191,0 \text{ Вт/м}^2$ соответственно. Максимальное значение среднемесячной поглощённой радиации отмечается в январе для Австралии, где оно достигает $392,9 \text{ Вт/м}^2$.

Наибольшее среднее за год значение поглощённой солнечной радиации $329,4 \text{ Вт/м}^2$ наблюдается над территорией Индонезии, расположенной вблизи экватора. Различие между максимальным и минимальным среднемесячными значениями здесь невелико и составляет $45,3 \text{ Вт/м}^2$.

Экстремальные среднемесячные значения поглощенной радиации выявляются при визуальном анализе карт. В летние месяцы величины потока поглощённой радиации над Средиземным морем достигают 430 Вт/м^2 , в то время как в данном интервале широт в Атлантическом океане они не превосходят 360 Вт/м^2 . Это объясняется большой повторяемостью ясного неба (0-3 балла) над Средиземным морем (до 80%) в отличие от Центральной Атлантики, где эта величина в данный сезон составляет около 35%. Эта особенность связана с существованием Азорского антициклона, отрог которого распространяется летом на Средиземное море и южную Европу.

Большой интерес представляет выполнить сравнение величин поглощённой солнечной радиации для океана и суши. Таблица 2 представляет среднемесячные и среднегодовые величины (с их среднеквадратичными отклонениями, СКО) поглощённой радиации за 2010-2012 гг., осредненные по всей территории Земли в пределах $-45^{\circ}...45^{\circ}$ широты, а также отдельно для океана и суши. По данным этой таблицы можно проследить их внутригодовую и межгодовую изменчивость.

Таблица 2

Среднемесячные и среднегодовые величины поглощённой радиации за 2010-2012 гг., осредненные по всей зоне в пределах от -45° до 45° широты, а также по площади океана и суши, Вт/м²

Период	Вся территория			Океан			Суша		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
январь	307	308	307	326	328	327	263	262	261
февраль	314	316	316	328	331	331	277	278	277
март	316	318	316	323	327	323	294	292	295
апрель	307	306	307	307	306	305	301	300	304
май	291	291	291	285	285	284	299	301	302
июнь	284	285	289	276	277	283	296	296	300
июль	286	287	291	279	280	285	296	297	297
август	298	298	296	295	294	292	300	301	299
сентябрь	310	310	307	314	313	310	296	299	296
октябрь	312	312	310	322	324	320	285	282	284
ноябрь	307	307	304	322	323	320	270	265	265
декабрь	304	300	301	324	319	321	257	256	255
среднегодовое	303,0	303,2	303,0	308,4	308,8	308,4	286,2	285,7	286,2
СКО	10,9	11,0	9,3	19,6	19,9	18,1	15,6	16,6	17,5

Как видно из таблицы 2, при осреднении по всей рассматриваемой широтной зоне внутригодовые изменения поглощённой радиации существенно меньше, чем у океана и суши в отдельности. При этом внутригодовые вариации для суши меньше, чем у океана.

На рис. 4 показаны осреднённые за три года внутригодовые изменения поглощённой солнечной радиации для рассматриваемых участков поверхности Земли.



Рис. 4 Осреднённые за три года внутригодовые изменения поглощённой солнечной радиации для рассматриваемых участков поверхности Земли в зоне от -45° до 45° широты, Вт/м²

Рассматриваемая поверхность Земли располагается симметрично относительно экватора. Поэтому наблюдаемые внутригодовые изменения поглощенной радиации являются следствием известной асимметрии распределения суши и океана.

В таблице 3 приведены результаты расчетов величин поглощенной радиации, осредненных по акваториям трех различных океанов в пределах диапазонов широт, покрываемых наблюдениями радиометром ИКОР-М. Как видно из таблицы, межгодовая вариация данной характеристики практически одинакова для Тихого и Индийского океанов, а для Атлантического она заметно меньше. Внутригодовые вариации среднемесячных величин характеризуются значениями СКО. Для Атлантического и Тихого океанов СКО близки и находятся в интервале 10-14 Вт/м². Для Индийского океана СКО в 4-5 раз превосходит его значение у других океанов.

Внутригодовые вариации среднемесячных величин поглощенной радиации хорошо выявляются при осреднении результатов за все три года. Соответствующие графики приведены на рис. 5.

Таблица 3

Поглощённая солнечная радиация над океанами, Вт/м²

Период	Атлантический			Тихий			Индийский		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
январь	314	312	311	314	320	319	372	368	368
февраль	320	320	320	321	328	328	358	353	357
март	320	324	322	322	328	323	329	332	325
апрель	309	311	310	312	308	312	290	293	283
май	294	293	293	294	293	293	247	250	247
июнь	290	288	299	285	285	289	231	239	241
июль	287	289	296	290	290	291	237	240	250
август	298	298	300	304	303	299	267	266	264
сентябрь	309	307	306	319	316	314	307	310	306
октябрь	309	309	302	320	323	320	345	345	342
ноябрь	303	300	297	316	317	315	364	368	366
декабрь	306	299	302	315	311	311	373	368	371
среднегодовое	304,9	304,2	304,9	309,5	310,2	309,5	310,0	311,0	310,0
СКО	10,8	11,6	9,2	12,9	14,7	13,2	54,3	51,8	51,3

Существенные различия амплитуд на графиках объясняются особенностями географического расположения океанов. Атлантический и Тихий океаны имеют широтные границы приблизительно до $\pm 70^\circ$, в пределах которых располагается тропическая зона и зона умеренных широт. Условия осреднения для этих двух океанов достаточно близки. В летние месяцы северные части океанов получают максимум тепла, а южные - минимум. При усреднении за месяц по всем территориям этих океанов избыток тепла в Северном полушарии компенсируется его недостатком в Южном полушарии. В зимние месяцы имеет место обратная ситуация. В итоге амплитуды осредненных внутригодовых изменений становятся достаточно малыми.

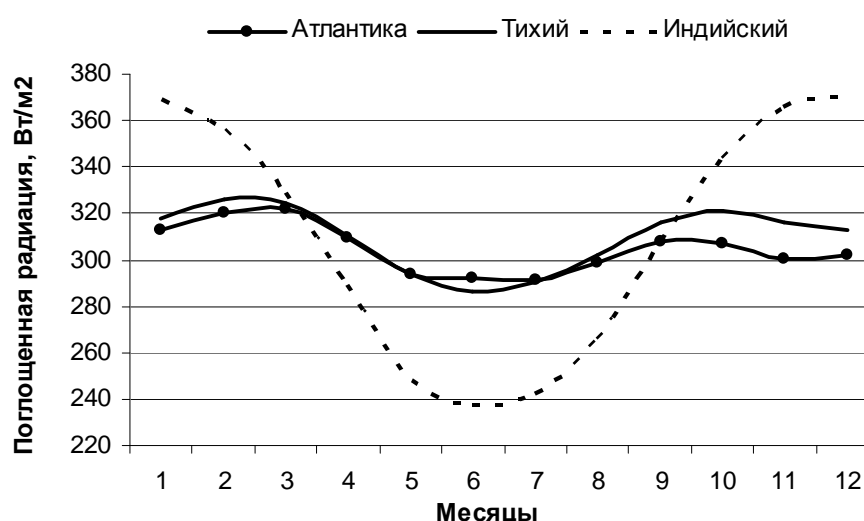


Рис. 5 Осреднённые за три года внутригодовые изменения поглощённой солнечной радиации для Атлантического, Тихого, Индийского океанов, Вт/м²

Совершенно иная картина наблюдается в Индийском океане. С юга он ограничен Антарктидой, а с севера – побережьем Евразии. Основная часть его акватории располагается в Южном полушарии и, следовательно, средняя величина поглощенной радиации должна иметь большую амплитуду годичной гармоники. Данный эффект хорошо заметен на рис. 5.

Для выявления вида широтной зависимости поглощенной солнечной радиации от долготы были выбраны 17 равновеликих меридиональных разрезов (шириной в четыре ячейки сетки в интервале широт $\pm 45^\circ$), показанных на рис. 6.

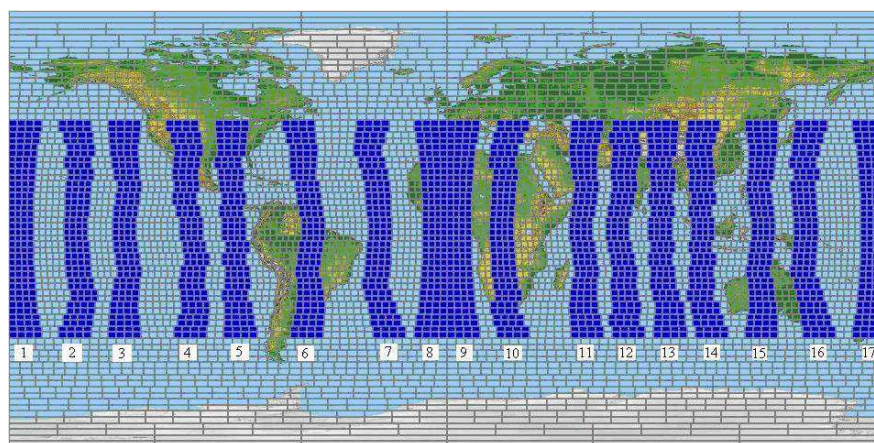


Рис. 6 Расположение меридиональных разрезов

Размер всех ячеек по широте одинаков и составляет $2,5^\circ$. Поэтому в каждом меридиональном разрезе содержится 4×36 ячеек. На чистый океан попали разрезы с номерами 1, 2, 3, 7, 17. Разрезы 11 и 14 также большей частью проходят по Индийскому океану. Остальные разрезы частично проходят по материкам и островам.

Были исследованы пространственно-временные особенности распределения поглощенной радиации во всех меридиональных разрезах за 2010-2012 гг. В качестве примера на рис. 7 приведены результаты для разрезов 3, 10 и 17, демонстрирующие большое разнообразие распределений. На рис. 7а представлено распределение для разреза 3, расположенного в Тихом океане. В южной части этого разреза (в интервале широт от $-37,5^\circ$ до -5°) области с большим поглощением солнечной радиации наблюдаются с ноября по февраль и устойчиво повторяются год от года. Следует отметить, что подобная картина присуща и другим разрезам над океанами.

Разрез 10, данные для которого представлены на рис. 7б, практически полностью располагается на Африканском континенте. В северной его части в течение трех лет сохранялась область с большим поглощением, расположенная над Средиземным морем. Разрез с номером 17 целиком проходит по Тихому океану. В данном разрезе (рис. 7в) наблюдаются устойчивые области с большими значениями поглощенной солнечной радиации как на юге (в ноябре-феврале), так и на севере (в мае-августе). Подобные распределения характерны для разрезов 1 и 6.

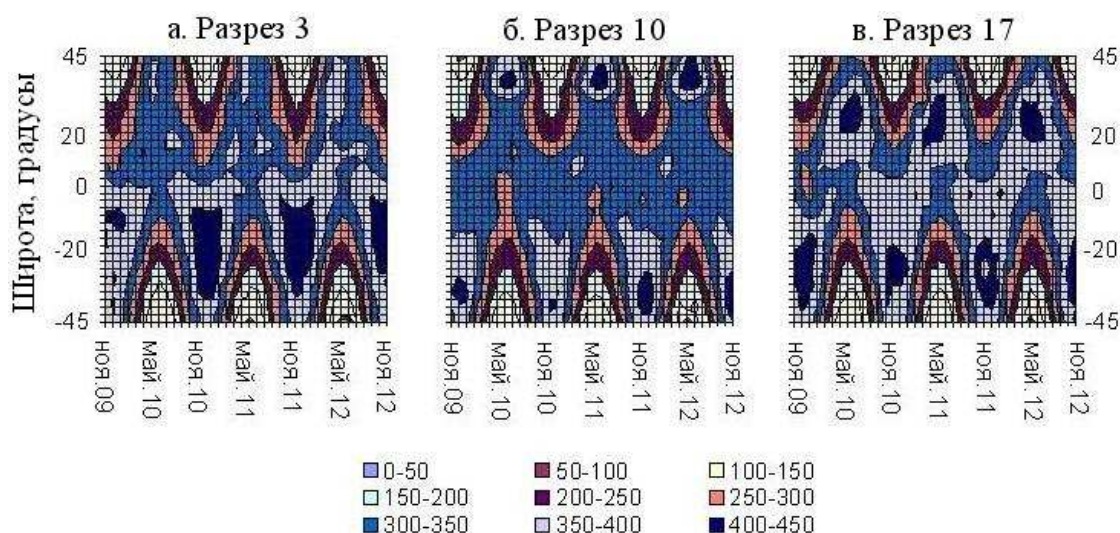


Рис. 7 Пространственно-временные распределения поглощенной радиации в меридиональных разрезах. Градации цветовой шкалы даны в Вт/м^2

Для более детального анализа распределений поглощенной радиации во всех выбранных разрезах нами была использована методика, которую можно условно назвать методом мультипликации - построение последовательности карт среднемесячных распределений для разрезов в течение года с января по декабрь.

Пример применения данного метода приведен на рис. 8, на котором показаны результаты для разреза № 7 (Атлантический океан) за 2010 г. В январе в данном меридиональном разрезе формируется область с повышенными значениями поглощенной радиации со значениями 400 – 440 Вт/м^2 . Она располагается в диапазоне широт от -35° до -10° . В феврале того же года эта зона переместилась на 5° севернее и значения поглощенной радиации в ней немного уменьшились. В марте она сместилась далее к северу и значения понизились до 360 – 400 Вт/м^2 . Уже в мае-июле зона больших значений уменьшилась и находилась в северной части меридионального разреза на широтах 30° - 40° , причём величина поглощенной радиации начала возрастать.

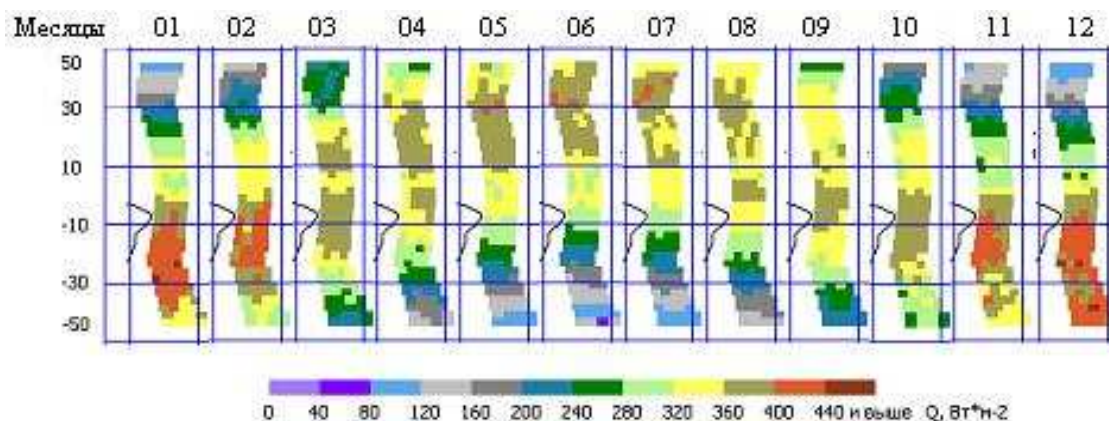


Рис. 8 Динамика распределения поглощённой солнечной радиации в 2010 г. для разреза номер 7 в Атлантическом океане

В августе зона больших значений поглощенной радиации начала мигрировать на юг, а её величины стали уменьшаться. Начиная с ноября поглощенная радиация возросла до значений 400 - 440 Вт/м².

Таким образом, предложенная методика позволяет достаточно наглядно описать динамику пространственно-временных изменений распределений.

Четвёртая глава посвящена анализу распределений альбедо для различных районов Земли с его высокими значениями и изучению их изменений со временем. Исследованы распределения альбедо над следующими районами: Гренландия, Амазонская низменность, Сахара, регион возникновения явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также регион с высокой муссонной активностью в Юго-Восточной Азии.

В качестве примера на рис. 9 приведены результаты для региона с высокой муссонной активностью в Юго-Восточной Азии (80-130° в.д., 15-40° с.ш.). В течение тёплого периода (конец весны, лето и начало осени) в данном регионе существовала область с высокими значениями альбедо, достигающими 60% и средним значением 35-40%.

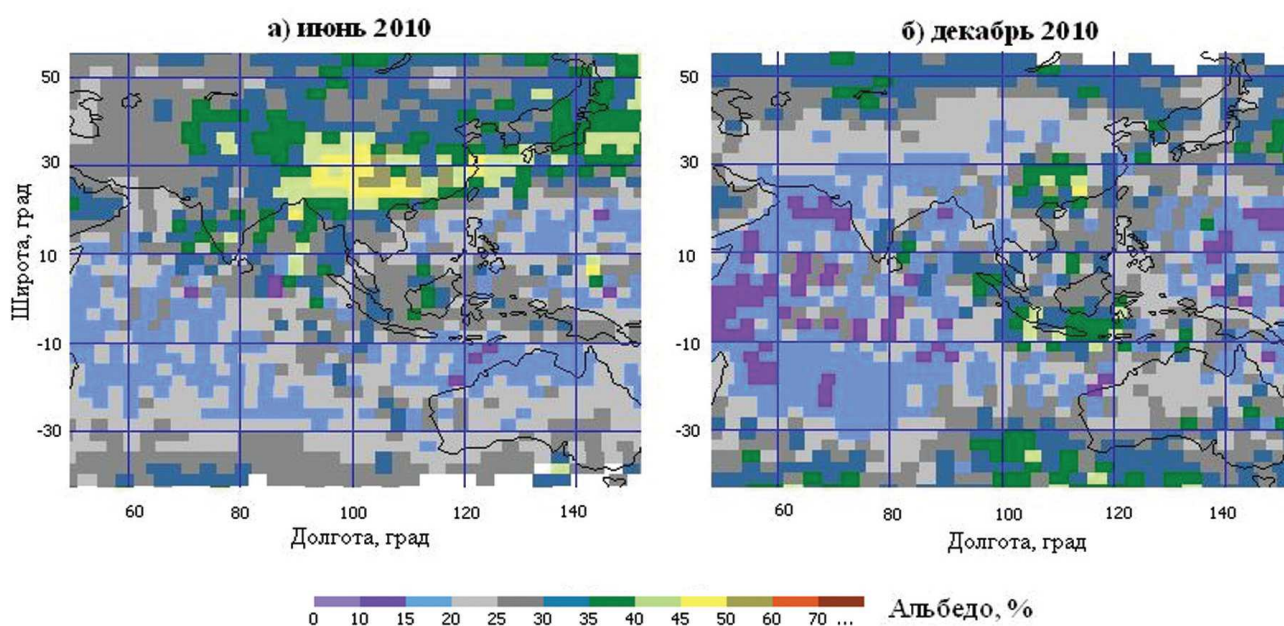


Рис. 9 Распределение среднемесячных величин альбедо над Юго-Восточной Азией

Зимой над этим регионом также наблюдаются высокие значения альбедо (до 45%), но только в небольшой области с координатами центра 25° с.ш., 110° в.д. На остальной территории, где в летние месяцы была зона высоких значений, зимой альбедо едва достигает 15-25%, с локальными максимумами 30-35%.

Особое внимание уделено исследованию широтного распределения альбедо для океана и суши, а также оценке вклада облачности в альбедо. Для этого была выбрана широтная зона в пределах от 60° ю.ш. до 60° с.ш. Широтные распределения облачности были получены путём осреднения данных проектов

ISCCP, MODIS и EECRA и взяты нами из работы Чернокульского А.В. и Мохова И.И. (Сравнительный анализ характеристик глобальной и зональной облачности по различным спутниковым и наземным наблюдениям // Исследование Земли из космоса. 2010. № 3. С.12-29). Для каждого широтного интервала с шагом 10° нами находилось среднеарифметическое значение трёх указанных рядов. Таким образом, были получены широтные распределения средних значений облачности по 13 значений, приведенные в таблице 4 и показанные на рис. 10б. Величины альбедо усреднялись нами по тем же широтным интервалам, что и облачность.

Сравнения альбедо и облачности проводились отдельно для суши и океана, а также суши и океана в целом. Рассматривались среднегодовые и среднесезонные: летние (июнь, июль, август - ИИА) и зимние (декабрь, январь, февраль - ДЯФ) значения характеристик. В таблице 4 в качестве примера представлены широтные распределения альбедо и облачности над океаном, а на рис. 10 построены их графики.

В ходе сравнения распределений облачности и альбедо было выявлено наличие их высокой положительной корреляции для океана, ее меньшие значения для океана и суши в целом и сравнительно малая корреляция для суши. Высокое значение корреляции над океаном (в среднем за год коэффициент линейной корреляции $r = 0,80$) обусловлено тем, что его поверхность практически однородна и на величину альбедо может повлиять только наличие облачности. В меньшей степени на альбедо влияет волнение, так как при достаточно больших размерах ячейки влияние волн усредняется.

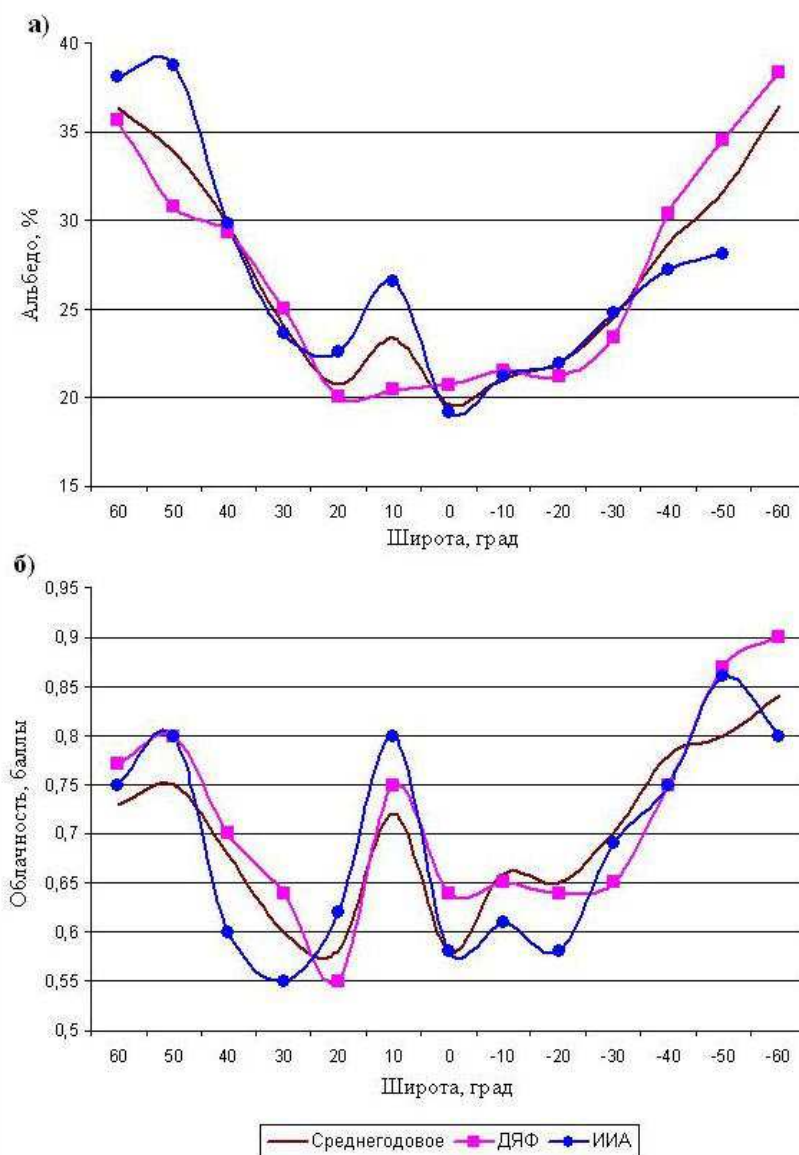


Рис. 10 Широтное распределение среднегодового и среднесезонных альбедо (а) и облачности (б) над океаном

Таблица 4

Широтные распределения облачности и альбедо над океаном

Широта центра интервала, градусы	Облачность, баллы			Альбедо, %		
	Среднегодовые	ДЯФ	ИИА	Среднегодовые	ДЯФ	ИИА
60	0,73	0,77	0,75	36	36	38
50	0,75	0,80	0,80	34	31	39
40	0,68	0,70	0,60	30	29	30
30	0,60	0,64	0,55	24	25	24
20	0,58	0,55	0,62	21	20	23
10	0,72	0,75	0,80	23	20	27
0	0,58	0,64	0,58	20	21	19
-10	0,66	0,65	0,61	21	22	21
-20	0,65	0,64	0,58	22	21	22
-30	0,70	0,65	0,69	24	23	25
-40	0,78	0,75	0,75	29	30	27
-50	0,80	0,87	0,86	32	35	28
-60	0,84	0,90	0,80	36	38	Нет данных

В течение года над океаном наблюдается заметное изменение значений коэффициента корреляции. Зимой он больше и равен 0,85, а летом уменьшается до значения 0,62.

Для океана и суши в целом коэффициент корреляции между альбедо и облачностью составляет в среднем за год 0,71, зимой 0,78 и летом 0,60. Значительный коэффициент корреляции обусловлен тем, что рассматриваемая широтная зона (от 60° ю.ш. до 60° с.ш.) на 74% покрыта океанами, над которыми наблюдается большая корреляция между альбедо и облачностью.

Для суши значения коэффициента корреляции меньше и составляют: летом 0,46; зимой 0,42. Коэффициент корреляции для среднегодовых значений равен 0,20 и его малая величина связана с отсутствием значимой корреляционной зависимости облачности и альбедо весной и осенью. Облачность над сушей также вносит вклад в альбедо, но не является единственным фактором. Определенное влияние оказывают сезонные изменения альбедо подстилающей поверхности (формирование снежного и ледового покрова, изменения растительности и т.п.).

Известно, что при наличии линейной корреляции величин некоторая доля изменчивости одной величины будет определяться изменчивостью другой. Эта доля изменчивости характеризуется квадратом коэффициента корреляции. Так, вклад облачности в альбедо над океаном составляет 72% зимой (при коэффициенте корреляции $r = 0,85$), 38% летом ($r = 0,62$) и в среднем за год 64% ($r = 0,80$). Для суши и океана в целом вклад облачности в альбедо 61% зимой ($r =$

0,78), 36% летом ($r = 0,60$) и в среднем за год 50% ($r = 0,71$). Для суши вклад облачности не оценивался из-за малых значений корреляции.

В заключении перечислены основные результаты исследований:

1. Получена оценка погрешности измерений потока радиометром ИКОР-М и проведено сравнение его шкалы с данными других космических экспериментов. Показано, что относительная погрешность не превышает 1%.

2. Разработана методика расчетов среднемесячных значений альbedo и поглощённой солнечной радиации по данным спутниковых измерений потока отраженной коротковолновой радиации.

3. Оценены условия наблюдений земной поверхности радиометром ИКОР-М с орбиты гелиосинхронного ИСЗ «Метеор-М» № 1. Обоснован выбор широтных границ зоны, в которой проводился анализ составляющих радиационного баланса Земли.

4. Разработаны алгоритмы и составлена компьютерная программа редактирования и анализа полей для ИКОР-М «IKOR Fields Editor».

5. Построены карты глобальных распределений среднемесячных значений отраженной коротковолновой радиации, альbedo и поглощённой солнечной радиации на верхней границе атмосферы, по которым проанализированы пространственные и временные изменения составляющих радиационного баланса Земли.

6. Проведен анализ изменений альbedo и поглощённой солнечной радиации для Амазонской низменности, в тропической Африке, регионах действия явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также регионе с муссонной активностью. Исследована возможность обнаружения явления Эль-Ниньо в Тихом океане по изменениям составляющих радиационного баланса. Показано, что Эль-Ниньо 2009-2010 гг. сопровождалось увеличением среднего по региону альbedo до 35-40%. В январе и феврале 2010 г., во время максимальной фазы развития явления, на долготе 180° вблизи экватора наблюдалась область со значением альbedo 45%.

7. Исследованы распределения поглощённой солнечной радиации в меридиональных разрезах на различных долготах. Для разных разрезов максимальная величина среднемесячного поглощенного потока солнечной радиации может изменяться приблизительно в два раза.

8. Получены широтные распределения альbedo для океана, суши, а также океана и суши в целом. Проведено сопоставление широтных распределений альbedo с облачностью. Оценен вклад облачности в альbedo для океана и суши. Показано, что для океана этот вклад в среднем за год составляет 64%, а для суши он незначителен.

9. Создан архив карт среднемесячных значений составляющих радиационного баланса Земли по данным наблюдений радиометром ИКОР-М с ИСЗ «Метеор-М» № 1 за пять лет с 2009 по 2014 гг., имеющий открытый доступ в сети Интернет (URL <http://www.sgu.ru/structure/geographic/metclim/balans>).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Скляр Ю.А., Воробьев В.А., Котума А.И., **Червяков М.Ю.**, Фейгин В.М. Измерения компонентов радиационного баланса Земли с ИСЗ "Метеор-М" № 1. Аппаратура ИКОР-М // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №2. С. 173-180

2. Скляр Ю.А., Воробьев В.А., Котума А.И., **Червяков М.Ю.**, Фейгин В.М. Алгоритм обработки данных наблюдений уходящей коротковолновой радиации с ИСЗ "Метеор-М" № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №3. С. 83-90.

3. Скляр Ю.А., **Червяков М.Ю.**, Воробьев В.А., Котума А.И., Фейгин В.М. Особенности распределения поглощенной солнечной радиации в 2010 – 2012 годах по данным с ИСЗ «Метеор – М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 272-283.

4. Скляр Ю.А., **Червяков М.Ю.**, Воробьев В.А., Котума А.И., Фейгин В.М. Особенности распределения альбедо в 2010 – 2012 годах по данным с ИСЗ «Метеор – М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 107-117.

5. Скляр Ю.А., **Червяков М.Ю.**, Воробьев В.А., Котума А.И., Фейгин В.М. Некоторые результаты обработки данных поглощенной солнечной радиации и альбедо, полученных с помощью аппаратуры ИКОР-М // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2013. Вып. 2. Т. 13. С. 30-33

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

6. Котума А.И., Скляр Ю.А., **Червяков М.Ю.** Программа редактирования и анализа полей для ИКОР «IKOR Fields Editor». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618768 от 17 сентября 2013 года.

Публикации в других изданиях:

7. Скляр Ю. А., Фейгин В. М., Воробьев В. А., Котума А. И., Семёнова Н. В., **Червяков М. Ю.** Первые результаты обработки со спутника «Метеор-М» № 1 // Погода и климат: новые методы и технологии исследований: сб. науч. тр. / под ред. Калинина Н. А. Пермь: Изд-во Перм. гос. Ун-та, 2010. С. 52–56.

8. Скляр Ю. А., Воробьев В. А., Котума А. И., Семенова Н. В., Фомина Н. В., **Червяков М. Ю.**, Фейгин В. М. Уходящая коротковолновая радиация и альбедо на верхней границе атмосферы по наблюдениям с ИСЗ «Метеор-М» № 1: материалы VIII Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2010. С. 53–54.

9. Скляр Ю.А., Воробьев В.А, Котума А.И., **Червяков М.Ю.**, Фейгин В.М. Алгоритм расчетов при обработке данных наблюдений уходящей коротковолновой радиации с ИСЗ "Метеор-М" № 1 // Тезисы. Девятая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 14-18 ноября 2011 г.

URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=30&thesis=2968

10. **Chervyakov M. Y.**, Sklyarov Y. A. The Measurement of the Outgoing Short-Wave Radiation from Satellite «Meteor-M» № 1 // Представляем научные достижения миру. Естественные науки: материалы конференции молодых ученых «Presenting Academic Achievements to the World». Изд- во Сарат. ун-та, 2012. Вып. 3. С. 23-26.

11. **Червяков М.Ю.**, Складов Ю.А., Котума А.И. Наблюдения уходящей коротковолновой радиации с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // Тезисы XVI международной конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты» 2012. С.109.

12. **Червяков М.Ю.**, Складов Ю.А., Котума А.И. Наблюдения уходящей коротковолновой радиации с искусственного спутника Земли «Метеор-М» № 1 // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты: труды XVI Международной школы-конференции молодых ученых / РАН, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова [и др.] – Москва: Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. 2012. С. 212-215.

13. Складов Ю.А., Котума А.И., **Червяков М.Ю.** Региональные особенности распределения альbedo и поглощённой солнечной радиации в 2010-2012 гг. // Тезисы докладов международной научной конференции по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Казань. 2012. С. 203.

14. Складов Ю.А., Воробьёв В.А., Котума А.И., **Червяков М.Ю.** Уходящая коротковолновая радиация и альbedo по измерениям радиометром ИКОР с ИСЗ Метеор-М № 1 // Тезисы. Десятая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2012 г.

URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=27&thesis=3574

15. Складов Ю.А., Воробьёв В.А., Котума А.И., **Червяков М.Ю.**, Фейгин В.М. Оценки поглощённой солнечной радиации по материалам наблюдений с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // Тезисы. Десятая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2012 г.

URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=27&thesis=3572

16. **Червяков М.Ю.**, Складов Ю.А., Котума А.И. Особенности распределения альbedo и поглощённой солнечной радиации в 2010-2012 годах по данным с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // Тезисы XVII Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» ИПФ РАН, Н. Новгород, 2013. С. 57.

17. Складов Ю.А., **Червяков М.Ю.**, Воробьёв В.А., Котума А.И., Фейгин В.М. Радиометр ИКОР-М: работа продолжается // Тезисы. Одиннадцатая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 11-15 ноября 2013 г. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=78&thesis=3834

18. **Червяков М.Ю.**, Складов Ю.А., Котума А.И. Взаимосвязь температуры поверхности океана с поглощённой солнечной радиацией на верхней границе атмосферы // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические

процессы. Тезисы докладов 18-й Всероссийской школы-конференции молодых учёных / Геофизическая обсерватория "Борок"- филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта- Ярославль: Филигрань, 2014. С. 36-37.

19. **Червяков М.Ю.**, Скляров Ю.А., Котума А.И. Распределение и вариации альбедо и радиационный режим Гренландии // Международная школа-конференция молодых учёных "Изменения климата и окружающей среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация". 14-20 сентября 2014 года. Кисловодск. Сборник тезисов докладов. М.: ГЕОС, 2014. С.127-129.

20. **Червяков М.Ю.** Исследование пространственно-временного распределения альбедо и поглощённой солнечной радиации на Земле по данным радиометра ИКОР-М / Book of Abstracts of First International Scientific Conference of young scientists and specialists "The role of multidisciplinary approach in solution of actual problems of fundamental and applied sciences (Earth, technical and chemical). Баку, 2014. С. 186-188.

21. **Червяков М.Ю.**, Скляров Ю.А., Котума А.И. ИКОР-М. Пять лет на орбите / Материалы Международной конференции «Аэрозоль и оптика атмосферы» (к столетию Г.В. Розенберга) - М.: ГЕОС, 2014. С. 96

22. Скляров Ю.А., **Червяков М.Ю.**, Воробьёв В.А., Котума А.И. Мониторинг составляющих радиационного баланса Земли с помощью современных российских спутников серии «Метеор-М» // Тезисы. Двенадцатая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2014 г. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4569.